

DURABILIDAD DE MORTEROS DE CEMENTO PORTLAND SOMETIDOS A AMBIENTES AGRICOLAGANADEROS: CASO REAL.

J. Massana¹, E. Sánchez¹, R. Antón², A. Moragues² y A. Guerrero³

¹GI Instalaciones Agro-ganaderas y Medio Ambiente. EUIT Agrícola. Universidad Politécnica de Madrid. Ciudad Universitaria, s/n 28040 Madrid, España.

²GI Tecnología de la Construcción y Ciencia de los Materiales. Universidad Politécnica de Madrid. Ciudad Universitaria, s/n 28040 Madrid, España.

³Instituto Ciencias de la Construcción "Eduardo Torroja". Consejo Superior de Investigaciones Científicas. C/ Serrano Galvache, 4, 28033 Madrid, España.

RESUMEN

En los ambientes agrícola-ganaderos, los morteros de cemento Portland, son materiales ampliamente utilizados. Éstos se ven expuestos al contacto permanente con los purines del ganado con un deterioro que supone un elevado coste medioambiental y económico para las explotaciones. El objetivo principal de este trabajo es estudiar el comportamiento de los morteros sumergidos durante 60 meses en una balsa de purín de cerdo. Se han empleado cuatro tipos de cemento, un cemento Portland tradicional y tres cementos con adición de cenizas volantes. Se analiza el comportamiento resistente y los cambios microestructurales, en términos de porosidad y distribución de tamaño de poro, mediante porosimetría por intrusión de mercurio. Los resultados obtenidos indican que la utilización de cementos con características sulforresistentes no está justificada debido a que su comportamiento resistente es peor que el obtenido con cementos con bajo contenido de cenizas, y son más susceptibles a la degradación provocada por el purín. Para los ambientes agrícola-ganaderos, se aconseja utilizar morteros de cementos con cenizas volantes.

Palabras clave: instalaciones ganaderas, purín de cerdo, cemento Portland, cenizas volantes.

ABSTRACT

Cement and its derivatives, mortar and concrete, are widely used in agricultural and livestock housing. They are exposed to contact with slurry, so degradation causes not only economic loss but also environmental problems. The main purpose of this work is to study the behaviour of cement mortars submerged for 60 months on pig slurry. To achieve this purpose four cement types were selected from those usually recommended in the farming and livestock field: one sulphate-resistant Portland cement, and three Portland cement with fly ash. Mechanical strength behaviour and microstructural porosity changes were evaluated. Results show that use of cements with sulphate-resistant characteristics is not justified because its resistance behaviour is worse than cements with low ash content. Moreover, their porosimetric characterization shows greater susceptibility to being degraded. So we recommend use of cement mortars with fly ash in agricultural-livestock environments.

Keywords: livestock facilities, pig slurry, Portland cement, fly ash.

INTRODUCCIÓN

El desarrollo de la ganadería intensiva ha provocado un rápido crecimiento de la producción en el sector porcino, que ha modificado sus características productivas, sanitarias, económicas y medioambientales. Por sus características zootécnicas (tanto fisiológicas, patológicas, nutricionales, de manejo, etc.), la porcinocultura ha alcanzado el mayor grado de industrialización y de intensificación productiva, del sector ganadero. Este hecho se pone de manifiesto por el continuo incremento del censo, acompañado del incremento del tamaño de las explotaciones, pero a costa de un menor número de las mismas.

En estas condiciones se rompe el binomio agricultura-ganadería de las explotaciones tradicionales, que ha originado un aumento de la problemática medioambiental, relacionados con la acumulación y gestión de los grandes volúmenes de estiércoles y purines producidos.

Las infraestructuras de almacenamiento del purín son generalmente fosas o balsas. En el primer caso, son depósitos de paredes verticales, contruidos in situ con hormigón armado, o con fábrica de ladrillo o bloques revestidos de mortero, o también pueden emplearse elemento prefabricados revestidos de morteros de cemento.

La presencia de prefabricados de hormigón es cada vez más frecuente en el interior de las explotaciones, en los elementos estructurales, en los cerramientos, en las divisiones interiores y especialmente en los suelos enrejillados.

Estos elementos constructivos entran en contacto, de forma permanente o discontinua, con el purín además de con restos de la alimentación y aguas de limpieza, a los que hay que añadir el efecto de la abrasión producida por los animales. Todo ello puede provocar la degradación de estos elementos con las consecuentes pérdidas económicas en las explotaciones que eso conlleva.

En la Instrucción EHE [1] se recogen las estrategias de durabilidad de morteros y hormigones especificando la necesidad de elección de materias primas adecuadas a la clases de exposición a las que se encuentran sometidas a lo largo de su vida útil. Dentro de estas clases no se contemplan, como clases de especial agresividad, los ambientes ganaderos, aunque datos experimentales muestran un deterioro superficial sistemático por los componentes químicos de carácter ácido [2] presentes en el purín. La necesidad de conocer el comportamiento de los morteros y hormigones, más frecuentemente usados en estos ambientes, así como determinar el cemento más adecuado para su uso en los mismos, justifica este trabajo.

En términos generales el purín de cerdo es un material acuoso, complejo y variable en su composición, con un contenido muy bajo de materia seca (90% de agua), con presencia de ácidos orgánicos, acético y butírico principalmente y distintas sales sulfhídricas procedentes de la urea [3, 4]. Su variabilidad está influida por factores relacionados con la gestión de la explotación y con las características de los animales: edad, raza, estado fisiológico [5],...etc.

El objetivo de este trabajo es determinar el comportamiento que presentan los morteros, preparados con cuatro tipos de cemento, de uso habitual en el ámbito agrícola-ganadero español, cuando se mantienen sumergidos en purín de cerdo durante un periodo prolongado de cinco años. Las diferencias de comportamiento se establecen a partir de la evolución de la resistencia mecánica a compresión y las variaciones en la distribución porosa.

MATERIALES Y MÉTODOS

Cementos

Se han utilizado cuatro cementos. Un cemento portland puro, resistente a sulfatos CEM-I SR 42.5N, recomendado para la elaboración de elementos prefabricados sometidos a la presencia de sulfatos y tres cementos con cenizas volantes, recomendados para ambientes de cierta agresividad química. Se han elegido dos cementos tipo II, uno con hasta un 20% de cenizas CEM II/A-V 42.5R, y otro con hasta un 35% de cenizas CEM II/B-M(V-L) 32.5N. Los cementos tipo II son los de máxima producción en España, y en particular el segundo de ellos es el de mayor difusión en el ámbito rural. Por último se ha elegido un cemento puzolánico CEM IV/B-V 32.5N, con hasta un 55% de cenizas volantes, con el que se abarcan todos los rangos, en cuanto a contenido en cenizas, que establece la Norma Europea UNE-EN 197-1:2000 [6]. La composición química y mineralógica es la que recoge la tabla 1.

Tabla 1. Composición química y mineralógica de los cementos utilizados.

Cemento Denominación simplificada	Composición (% en peso)										
	CaO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MgO	K ₂ O	SO ₃	Cl	Na ₂ O	CO libre	Ignition loss
CEM I	64.4	19.1	3.9	4.7	1.3	0.7	3.1	-	0.2	2.1	2.6
CEM II-A	48.21	35.35	5.67	3.6	1.74	1.35	2.23	0.008	-	-	1.78
CEM II-B	51.36	24.80	9.19	3.25	2.14	1.41	2.58	0.006	-	-	1.75
CEM IV	26.05	57.45	7.4	3.5	1.24	1.39	1.26	0.006	-	-	1.69

Se fabricaron 234 probetas normalizadas (40x40x160mm) con una relación agua/cemento 0.5 y una relación arena/cemento 3/1, de acuerdo con la Norma Europea EN 196-1:1996 [7]. Las probetas, una vez fabricadas, se desmoldaron a las 24 horas y fueron curadas en agua durante 28 días a 22±2°C. Finalizado el curado, tres probetas de cada cemento se caracterizaron mecánicamente (resistencia a flexión y compresión) y una cuarta probeta se utilizó para la caracterización microestructural. El resto de probetas curadas fueron sumergidas en una balsa de purín experimental de 4x8 m y 1 m de profundidad.

Medio agresivo: Purín

El purín de la balsa experimental en la que se colocaron las probetas procede de una explotación integral de porcino del término municipal de Etreros (Segovia, España).

La composición del purín depende de muchos factores, pero principalmente del tipo de animal, de la fase fisiológica y productiva, de las características de la alimentación y del manejo en la explotación. Como consecuencia de esta variabilidad de factores implicados la composición del purín varía a lo largo del tiempo.

Durante los primeros tres años de experimentación, cada 3 o 6 meses, se han realizado muestreos del mismo y posteriormente se procedió a un análisis químico. Los valores medios y extremos son los que muestra la tabla 2.

De los valores de la tabla cabe destacar que el pH oscila entre 7.4 y 8.2, a pesar de las concentraciones de ácidos como el acético y el propiónico. Este mantenimiento del pH se debe al par ácido/base NH₄⁺/NH₃. La concentración de nitrógeno amoniacal es muy alta, entre 500 y 2300 mg/l, procedente de las transformaciones del nitrógeno orgánico. Es destacable también la presencia de iones cloruro.

Tabla 2. Composición del purín y valores extremos

		Mínimo	Medio	Máximo
pH		7.43	7.94	8.20
Conductividad (mS)		5.68	8.92	13.25
Potencial redox (mV)		-304.00	-169.38	-71.00
Sólidos totales (mg/l)		4.07	5.87	7.19
Sólidos fijos (mg/l)		1.90	2.91	3.50
Sólidos volátiles (mg/l)		2.04	2.95	3.98
Nitrógeno Total (%)		0.06	0.12	0.20
Nitrógeno amoniacal (%)		0.05	0.09	0.12
Sulfuros (mg/l)		5.36	71.32	105.00
Bicarbonatos (mg/l)		3.38	5.68	10.55
Aniones	Sulfatos (mg/l)	0.00	4.51	9.70
	Cloruros (mg/l)	61.00	453.04	1388.00
Ácidos grasos	Acético (mg/l)	32.55	153.79	286.70
	Propiónico (mg/l)	0.00	40.96	124.60
	Isovalérico (mg/l)	0.00	2.15	3.50

Proceso experimental

Las probetas han sido extraídas de la balsa experimental a los 3, 6, 12, 24, 36, 48 y 60 meses de exposición. Antes de su caracterización, y después del lavado con agua, se mantuvieron sumergidas 48 horas en agua, para conseguir su estabilización.

Se han empleado tres probetas para la caracterización mecánica, determinándose la resistencia a flexión y compresión de acuerdo a las prescripciones de la norma EN 196-1:1996 [7].

Con los datos de la resistencia a compresión se realiza un análisis de la varianza, mediante el programa StatGraphics v.5 (2000), considerando como variable dependiente la resistencia a compresión y como factores el cemento, el tiempo y su interacción.

La caracterización microestructural mediante porosimetría por intrusión de mercurio (PIM), se ha realizado en una probeta no sometida a carga mecánica. Esta técnica nos permite conocer la porosidad total del material y la distribución del tamaño de poro a los distintos tiempos de exposición. Este ensayo se ha llevado a cabo con un equipo Micromeritics, modelo Autopore IV 9500, con muestras de aproximadamente 3 ± 0.01 g estabilizadas a peso constante a 40°C. Estas muestras, se obtuvieron de la parte exterior de las probetas, que es la zona que está más en contacto con el medio agresivo.

La elaboración de los datos obtenidos permite representar de forma gráfica la evolución de la distribución porosa. La estructura porosa queda definida por el tamaño de sus poros, y para ello se ha adaptado la clasificación de Mindess [8] a las características del aparato de medición empleado, que está limitado a valores de diámetro de poro superiores a 5 nm. Se establecen 4 rangos de tamaño de poro: Macroporos ($\varnothing > 10 \mu\text{m}$), Capilares grandes ($50 \text{ nm} < \varnothing < 10 \mu\text{m}$), capilares medianos ($10 \text{ nm} < \varnothing < 50 \text{ nm}$) y capilares pequeños ($5 \text{ nm} < \varnothing < 10 \text{ nm}$).

Con esta división de los tamaños de poro se han elaborado diagramas de evolución de la distribución del tamaño de poro. Se han analizado, también, estadísticamente la proporción de cada uno de estos tamaños, mediante análisis de la varianza.

RESULTADOS

Resistencias mecánicas

El análisis de la varianza de los valores de tensión a compresión muestra que los factores principales Cemento (A) y Tiempo (B), así como la interacción de ambos (AB), tienen un efecto estadísticamente significativo, con un P-valor inferior a 0.05.

El resumen de los valores medios de las resistencias a compresión, utilizados en el análisis estadístico bifactorial son los que recoge la tabla 3.

Tabla 3. Tabla de Medias por mínimos cuadrados para la Compresión (kN)

Nivel	Frecuencia	Media	Error Estándar	Límite Inferior	Límite Superior
Media total	78	67.432			
Cemento					
CEM I	20	71.5765 ^a	0.352677	70.8666	72.2864
CEM II/A-V	19	71.8606 ^a	0.361386	71.1332	72.5881
CEM II/B-M	20	63.6946 ^b	0.352677	62.9847	64.4045
CEM IV/B	19	62.5971 ^b	0.361386	61.8696	63.3245

a, b: factor con diferentes superíndices son significativamente diferentes

Los valores medios máximos, después de 60 meses de inmersión en la balsa de purín, corresponden a las probetas de mortero elaboradas con el cemento CEM II-A (71.9 MPa), cuyos intervalos de confianza se solapan con los del CEM I (71.6 MPa). Los valores medios mínimos corresponden a los de cemento CEM IV con un valor de 62.6 MPa, es decir un 13% menos que en CEM II-A. No existen diferencias significativas entre las tensiones a compresión de los morteros de cementos de la misma clase resistente.

En la figura 1 se muestra la evolución de los valores de la resistencia a compresión y pone en evidencia la significancia de la interacción cemento-tiempo.

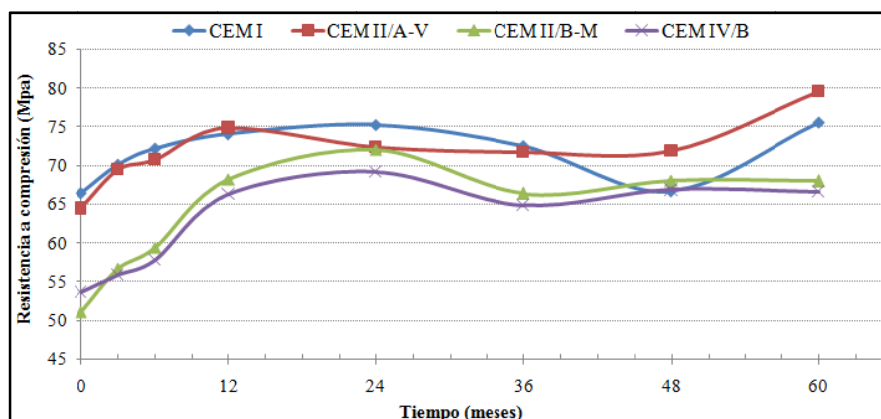


Figura 1. Variación de la resistencia a compresión. Análisis a 60 meses en purín

Los resultados iniciales están marcados por la clase resistente de los cementos. Los cementos CEM I y CEM IIA son de clase 42.5 y los cementos CEM IIB y CEM IV son de clase 32.5.

A partir de las resistencias iniciales, se observa un incremento hasta los 24 meses. Este incremento es más significativo en los dos cementos con mayor proporción de cenizas volantes, que son también los de clase resistente inferior. A los 24 meses los valores resistentes en los cuatro morteros se muestran muy similares, con diferencias mínimas entre los morteros de cemento CEM IIA y CEM IIB. Al finalizar el ensayo, los valores de compresión en los morteros

CEM II/B y CEM IV son significativamente iguales y menores que los obtenidos para los otros dos cementos. Esto puede ser debido a que elevadas cantidades de ceniza no aseguran una mayor resistencia a largo plazo ya que parte de ella trabaja como material inerte [9]. La disponibilidad de portlandita condiciona las reacciones puzolánicas, de manera que cuando las cenizas se encuentran en altas cantidades la posibilidad de acceder a ella es menor [10]. En los trabajos desarrollados por Molina et al. [11, 12] en los que se compara el comportamiento resistente en un hormigón con bajo contenido de conglomerante y varios contenidos de cenizas, se obtiene que el coeficiente de eficiencia de éstas es mayor cuando el contenido de las mismas se encuentra limitado al 15%. Este resultado coincide con el obtenido en este trabajo, ya que es el CEM II/A, con un contenido de cenizas entre el 6-20%, es el que presenta mayor valor resistente a los 60 meses de exposición.

Porosimetría por Intrusión de Mercurio (PIM)

La porosidad total inicial máxima corresponde a los morteros de CEM I (12.5%) y la mínima a los de CEM IIA (10.6%). Después de 60 meses de exposición la mayor porosidad se observa en los morteros CEM IIB y CEM IV, con valores del 11.06% y 10.96%, siendo el mortero de cemento CEM IIA el de menor porosidad a los 60 meses de exposición, con un 9.95%.

Según la clasificación de poros considerada, los capilares medianos (10-50 nm) y grandes (50nm-10µm) son los que influyen en la resistencia y permeabilidad del material. Los capilares pequeños (5-10 nm) se asocian a los poros de gel. La proporción de capilares grandes es más significativa en el mortero de CEM I siendo los morteros de cementos con cenizas los que presentan la mayor proporción de capilares pequeños. La evolución de la distribución porosa y la porosidad total es la que se muestra en la figura 2 [13].

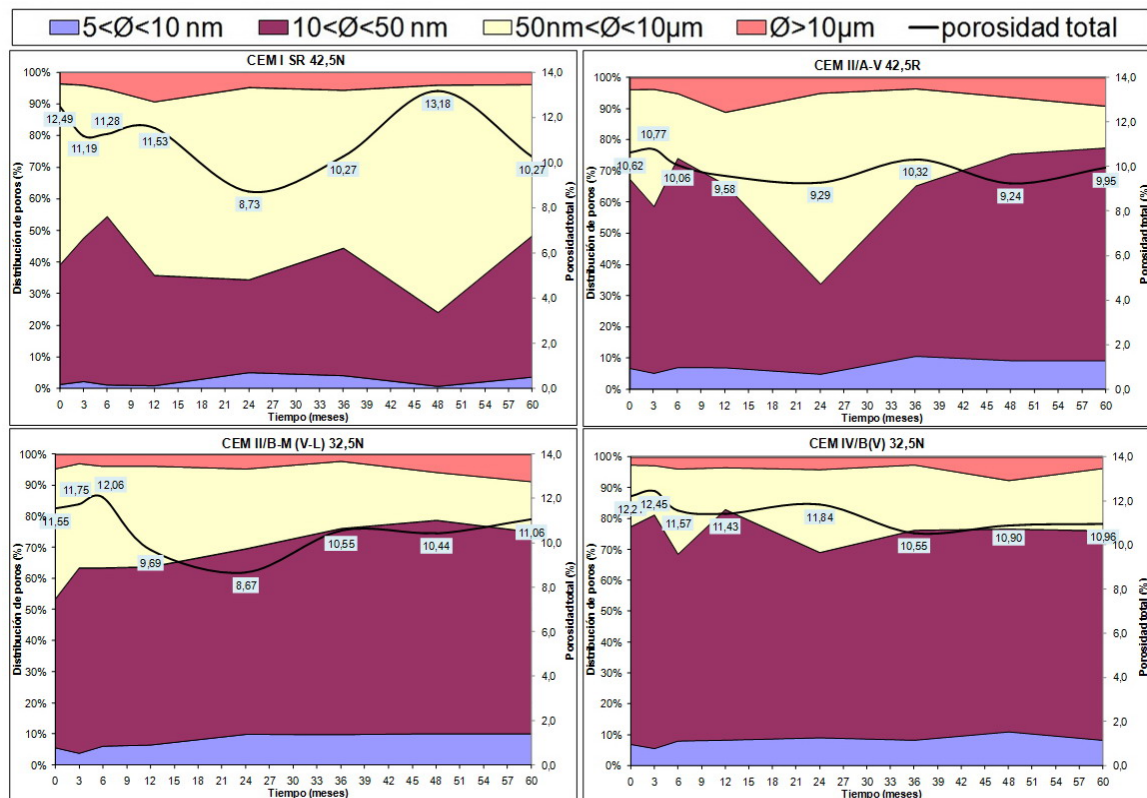


Figura 2. Evolución de la distribución porosa

Se aprecia un comportamiento distinto en la distribución porosa del mortero de CEM I con respecto a los morteros de cementos con cenizas volantes. En el mortero de cemento CEM I se observa, a lo largo de todo el tiempo de exposición, un alto porcentaje de capilares grandes y una baja proporción de capilares pequeños, estando estos últimos relacionados con la presencia del gel C-S-H. En este mortero y desde los 24 meses, se produce un notable incremento de la porosidad total, que llega a ser del 13.2% a los 48 meses, acompañado de un incremento en la proporción de capilares grandes.

En los morteros de cementos con cenizas la evolución es distinta. El mortero CEM IV es el que muestra una distribución porosa más estable a lo largo del tiempo de exposición, a pesar de presentar la mayor porosidad media total. En los morteros de cemento CEM II-A y CEM II-B, los cambios en la distribución porosa son más significativos, ligados a los mecanismos de hidratación propios de los cementos y a las reacciones puzolánicas de las cenizas. En ambos morteros se observa una reducción en la proporción de capilares grandes y un incremento de los poros de tamaño menor de 50 nm. En el caso del CEM II-A hay una disminución significativa de la proporción de capilares medianos y pequeños a los 24 meses, que reduce un 30% la porosidad total, con un aumento de los capilares grandes. A partir de los 36 meses y hasta la finalización del ensayo se observa un nuevo refinamiento de la distribución porosa, llegando a tener una cantidad de poros con diámetro inferior a los 50 nm que representa el 78% de la porosidad total.

En el mortero de cemento CEM II-B no hay cambios bruscos en la distribución porosa. Los procesos de disolución-precipitación provocan un refinamiento de la estructura porosa llegando a tener un 70% de la porosidad total a los 60 meses de exposición.

CONCLUSIONES

De los resultados obtenidos podemos obtener las siguientes conclusiones:

- Los cuatro morteros de cemento tienen un buen comportamiento, en cuanto a capacidad resistente y porosidad, mostrándose poco sensibles al ataque por el purín.
- El deterioro que pueden experimentar los morteros de cemento ensayados, debido a los mecanismos de precipitación-lixiviación propios de un ataque ácido en un medio acuoso, se ven mitigados por la superposición de las reacciones de hidratación propias de los cementos, junto con las reacciones puzolánicas debidas a las cenizas volantes.
- La utilización de cementos con características sulforresistentes (CEM I-SR 42.5N) en presencia de purines no está justificada. El comportamiento resistente de estos cementos es significativamente peor que el obtenido con cementos con bajo contenido de cenizas. Además el hecho de que la porosidad total y la proporción de capilares grandes y macroporos sea mayor que la de aquéllos, le confiere una mayor susceptibilidad a ser degradados.
- Para los ambientes agrícola-ganaderos con presencia de purines, se aconseja la elaboración de morteros empleando cementos con cenizas volantes.
- El cemento más ecoeficiente y sostenible a los cinco años de contacto permanente con el purín, es el CEM IV/B-V 32.5N, cuyo comportamiento durable es excelente. Alcanza buenas resistencias mecánicas en ambos medios, y la evolución de su distribución porosa se muestra muy estable con el tiempo y medio de exposición.
- Cuando sea necesario obtener morteros con mayores requerimientos resistentes, se recomienda el uso del cemento CEM II/A-V 42.5R. Es un cemento ecoeficiente, con altas resistencias iniciales y finales tras 60 meses de exposición.

AGRADECIMIENTOS

Los autores quieren agradecer al Ministerio de Ciencia y Tecnología (Proyecto BIA 2009-14395-C04-04) por el soporte financiero de este trabajo. Así mismo, agradecen la colaboración prestada por el Instituto Español del Cemento y sus Aplicaciones (IECA).

REFERENCIAS

1. MOPU. 2008. Instrucción de Hormigón Estructural. EHE, Ministerio de Fomento, Madrid, España.
2. De Belie, N.; Lenehan, J.J.; Braam, CR.; Svennerstedt, B.; Richardson, M.; Snock, B. 2000. Durability of building materials and components in the agricultural environment, Part III: Concrete structures. *Journal of Agricultural Engineering Research* 76 (1): 3-16.
3. Sánchez, M.; González, J.L. 2005. The fertilizer value of pig slurry. I: Values depending on the type of operation. *Bioresour Technology* 96: 117-193.
4. Sánchez, E.; Massana, J.; Garcimartín, M.A.; Moragues, A. 2008. Mechanical strength and microstructure evolution of fly ash cement mortar submerged in pig slurry, *Cement and Concrete Research* 38: 717-724.
5. Moral, R.; Moreno-Caselles, J.; Pérez-Murcia, M.; Pérez-Espinosa, A.; Rufete, B.; Paredes, C. 2005. Characterization of the organic matter pool in manures. *Bioresour Technology* 96, 153-158.
6. UNE-EN 197-1:2000, Cemento. Parte 1: Composición, especificaciones y criterios de conformidad de los cementos comunes., AENOR. España.
7. UNE-EN 196-1. 1996. Métodos de ensayo de cementos. Parte 1: Determinación de resistencia mecánicas, AENOR. España.
8. Mindess, S.; Young, J.F.; Darwin, D. (2003). "*Concrete*". Prentice Hall, Pearson Education, Inc. Upper Saddle River, NJ 07458. 2nd Edition. (2002).
9. Sivasundaram, V.; Carette, G.G.; Malhorta, V.M. 1991. Mechanical properties creep and resistance to diffusion of chloride ions of concretes incorporating high volumes of ASTM Class F fly ashes from seven different sources. *ACI Materials Journal* 88 (4): 407-416.
10. Papadakis, V.G. 1999. Effect of fly ash on Portland cement systems. Part I low calcium fly ash. *Cement and concrete research* 29:1727-1736.
11. Molina Bas, O.I. 2008. La influencia de las cenizas volantes como sustituto parcial del cemento Portland en la durabilidad del hormigón. Tesis Doctoral. Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos. Universidad Politécnica de Madrid.
12. Molina, O.; Moragues, A., Gálvez, J.C. 2007. La influencia de las cenizas volantes como sustituto parcial del cemento Portland: estudio de las propiedades mecánicas, permeabilidad y porosimetría. *Anales de Mecánica de Fractura*, 2 (24): 673-677.
13. Massana, J. 2010. Durabilidad de morteros de cemento en contacto con purines de cerdo. Tesis Doctoral. Escuela Técnica Superior de Ingenieros Agrónomos. Universidad Politécnica de Madrid.